

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра электроники, колебаний и волн

**Генерация многосолитонных комплексов, состоящих из темных
спин-волновых солитонов, в активном кольцевом резонаторе
с управляемой дисперсией и конкурирующими
нелинейностями**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студентки 4 курса 421 группы
направления 03.03.03 - радиофизика
факультета нелинейных процессов
Бир Анастасии Сергеевны

Научный руководитель

к.ф.-м.н., доцент кафедры ЭКиВ _____ Гришин С. В.

Зав. кафедрой электроники, колебаний и волн

член-корр. РАН, д.ф.-м.н.,
профессор _____ Трубецков Д. И.

Саратов 2019 г.

Введение

Многосолитонные комплексы являются связанными состояниями светлых и темных солитонов, которые активно изучаются в последние два десятилетия в нелинейной оптике [1-3], конденсации Бозе-Эйнштейна [4] и спин-волновой электронике [5, 6]. Эти структуры обладают свойствами, присущими двухатомной молекуле вещества [2], и являются перспективными для применения в качестве расширенных информационных битов в системах оптической связи [3]. Светлые солитоны, содержащиеся в многосолитонных комплексах, представляют собой импульсы или волновые пучки, распространяющиеся над шумовым фоном. Амплитудный профиль светлого солитона имеет колоколообразную форму, внутри которого фаза не меняется во времени [7]. С другой стороны, темный солитон формируется в виде узкого провала на амплитудном фоне [7]. Фаза внутри такого провала может претерпеть скачок на π .

В нелинейной оптике теоретически и экспериментально изучены следующие типы многосолитонных комплексов: 1) солитонная молекула - связанное состояние двух светлых и одного темного временных солитонов [2]; 2) солитонный кристалл, состоящий из нескольких десятков солитонных молекул [3, 8]; и 3) солитонный кластер, содержащий вращающиеся связанные состояния светлых и темных пространственных солитонов [9]. Все упомянутые выше связанные состояния образуются либо за счет управляемой дисперсии, когда оптические волокна с положительной и отрицательной дисперсией одновременно используются в цепи обратной связи лазерного резонатора с пассивной синхронизацией мод [3], либо за счет конкурирующих нелинейностей, когда оптическая среда поддерживает конкуренцию трех- и четырехволновых нелинейных взаимодействий [9]. Во всех случаях темные солитоны всегда образуют связанные состояния со светлыми солитонами. На сегодняшний день

известна только одна теоретическая работа, в которой рассматривалось распространение цепочки темных солитонов через оптическую среду [10].

В спин-волновой электронике большая часть теоретических и экспериментальных работ была посвящена фундаментальным светлым и темным спин-волновым солитонам огибающей [11]. Такие структуры формировались в регулярных магнонных волноводах или в активных кольцевых резонаторах, содержащих эти волноводы. В последнем случае периодические последовательности светлых или темных спин-волновых солитонов генерировались из одиночного импульса, циркулирующего по кольцу. Фазовый сдвиг между соседними импульсами последовательности равен 2π , а их длительность составляла несколько десятков наносекунд [12, 13]. Впервые генерация многосолитонных комплексов, содержащих только светлые спин-волновые солитоны, была получена в неавтономном кольцевом резонаторе [5]. Автономная генерация темных солитонных пар была продемонстрирована в работе [14]. Первое экспериментальное наблюдение связанных состояний светлых и темных спин-волновых солитонов было получено на активном кольцевом резонаторе с пассивной синхронизацией мод, в котором поддерживалась конкуренция между трех- и четырехволновыми нелинейными спин-волновыми взаимодействиями [6]. Фазовый сдвиг между соседними импульсами многосолитонного комплекса отличался от 2π и зависел от количества циркулирующих в кольце солитонов. Однако многосолитонные комплексы, состоящие только из темных спин-волновых солитонов, здесь не наблюдались.

Экспериментальное исследование многосолитонных комплексов в активном кольцевом резонаторе с регулярным магнитным волноводом

Для проведения экспериментальных исследований в данной работе использовался активный кольцевой резонатор, схематическое изображение которого представлено на рис.1. Основными элементами кольцевого резонатора были касательно намагниченный регулярный ЖИГ-волновод, два твердотельных транзисторных усилителя и аттенюатор. Внешнее постоянное магнитное поле \vec{H}_0 было приложено так, что в ЖИГ-волноводе возбуждалась поверхностная МСВ. Величина внешнего магнитного поля была равна $H_0 = 615$ Э. Волновод шириной 1 мм был вырезан из высококачественной монокристаллической пленки ЖИГ толщиной 15 мкм, выращенной на подложке из гадолиний-галлиевого граната (ГГГ) с использованием метода жидкофазной эпитаксии. В программе «COMSOL Multiphysics» было установлено, что величина поля размагничивания для волновода такой ширины имеет значение $H_d \cong -50$ Э. Тогда, для случая поперечного намагничивания внутреннее магнитное поле равно $H_{int} = H_0 + H_d = 565$ Э. Необходимо отметить, что данное значение магнитного поля меньше порогового значения магнитного поля, при котором возможны трехволновые процессы взаимодействия спиновых волн. Таким образом, в исследуемом регулярном ЖИГ-волноводе могут одновременно сосуществовать трех- и четырехволновые нелинейные спин-волновые взаимодействия.

На рис.2 представлены результаты, демонстрирующие генерацию многосолитонных комплексов, состоящих из темных солитонов огибающей. Из результатов, представленных на рис. 4а следует, что при выбранном значении коэффициента усиления кольца спектральные компоненты многочастотного сигнала перекрываются между

собой, образуя хаотический спектр ярко выраженным шумовым пьедесталом.

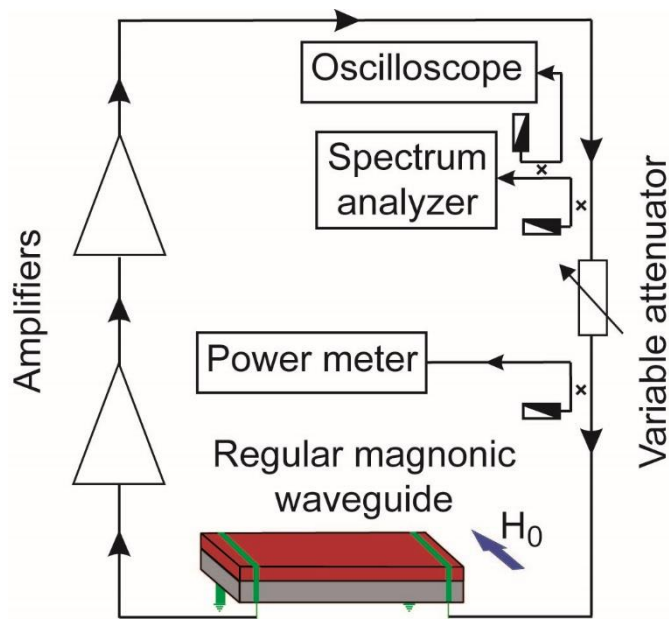


Рис.1. Схематическое изображение генератора темных спин-волновых солитонов.

В этом случае средняя мощность сигнала на входе регулярного ЖИГ-волновода имеет величину $P=+13.3$ дБмВт. Во временной области (см. рис.4b) на хаотическом амплитудном фоне огибающей образуются провалы, амплитуда внутри которых меняется хаотически, а период их следования является квазипериодическим. В фазовом пространстве (см. рис.2c) данному режиму генерации соответствует хаотический аттрактор, который представляет собой нерегулярные переходы фазовой траектории из области малых значений амплитуды в область больших значений амплитуды. На рис.2(d) показаны увеличенные фрагменты временной реализации, представленной ранее на рис.2а. Видно, что во временной области формируются многосолитонные комплексы, состоящие из «тонкой» структуры в виде трех-четырех относительно узких провалов. В подтверждение того факта, что данные паттерны являются многосолитонными комплексами, свидетельствует отличие фазового сдвига между соседними провалами от 2π , т.е. в данном случае в

кольце одновременно циркулируют несколько импульсов. Длительность каждого комплекса составляет величину порядка 0.5 мкс, а временной интервал между его провалами имеет величину около 150 нс. В центре каждого комплекса находится провал, амплитуда которого спадает практически до нуля, а амплитуды остальных провалов отличны от нулевых значений. На рис.2(е) показаны увеличенные фрагменты амплитудных и фазовых профилей центральных провалов каждого из трех многосолитонных комплексов. Из представленных результатов следует, что амплитудные и фазовые профили данных провалов качественно соответствуют амплитудным и фазовым профилям темных солитонов огибающей: амплитуда в центре каждого провала спадает практически до нуля, а фаза в центре каждого провала претерпевает скачок порядка π . Кроме того, длительность каждого центрального провала изменяется в пределах от 2.5 нс до 4 нс (длительность каждого провала определялась по половинному уровню от максимального значения амплитуды огибающей).

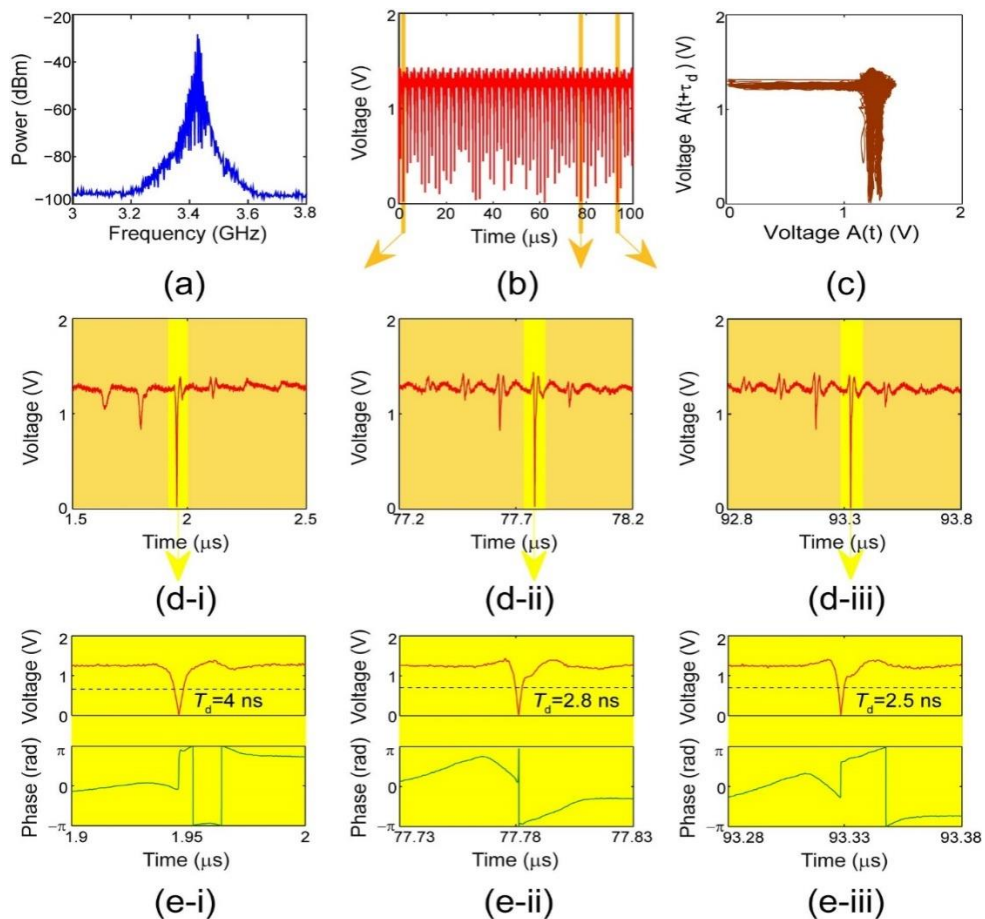


Рис.5 Спектры мощности СВЧ сигнала (левый столбец), временные реализации (центральный столбец) и проекции фазового портрета на плоскость параметров ($a(t), a(t + \tau_d)$) (правый столбец) огибающей, полученные при различных значениях коэффициента усиления кольца G : 9.25 дБ (а), 12.45 дБ (b) и 15.85 дБ (c).

Таким образом, в ходе экспериментальных исследований показано, что наличие у регулярного ЖИГ-волновода конкурирующих трех- и четырехволновых нелинейных спин-волновых взаимодействий совместно с насыщающейся нелинейностью усилителя приводят к генерации многосолитонных комплексов, состоящих из темных солитонов огибающей. Многосолитонный комплекс имеет длительность порядка 500 нс и состоит из 3-4 темных солитонов огибающей с длительностью, изменяющейся в пределах от 2.5 нс до 4 нс. Установлено, что данные многосолитонные комплексы наблюдаются только при наличии в цепи обратной связи магнетонного ЖИГ-волновода и в случае, когда выходной

усилитель усилительного каскада работает в режиме насыщения выходной мощности. Также продемонстрирована возможность управления режимами генерации многосолитонных комплексов за счет изменения уровня мощности СВЧ сигнала на входе ЖИГ-волновода. Показано, что с увеличением мощности сигнала квазипериодическая последовательность многосолитонных комплексов разрушается и генерируются хаотические последовательности таких структур. Это приводит к возникновению режима перемежаемости типа «хаос-хаос».

Многосолитонные комплексы в автоколебательной системе с нерегулярным Г-образным магنونным волноводом.

В данной главе исследуется активный кольцевой резонатор, в цепи обратной связи которого вместо регулярного магنونного волновода используется нерегулярный Г-образный магنونный волновод (рис.3).

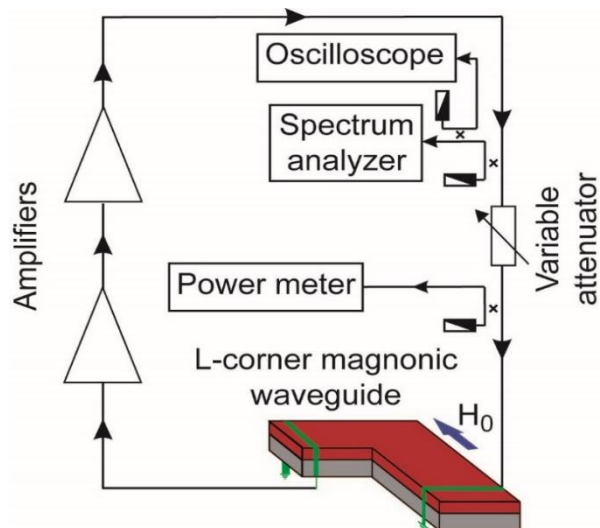


Рис.3 Блок-схема кольцевого резонатора с Г-образным нерегулярным магنونным ЖИГ-волноводом (а)

На рис.4 приведены спектр мощности, временные реализации и

фазовый портрет генерируемых многосолитонных комплексов при коэффициенте усиления кольца $G=9.85$ дБ. В этом случае средняя мощность сигнала на входе Г-образного магнонного волновода уменьшается до значения $P=+18$ дБмВт. Спектр сигнала, представленный на рис.4а, является широкополосным и содержит сетку частот, которая генерируется вследствие четырехволновых процессов взаимодействия на частотах собственных мод кольцевого резонатора. При этом на частоте каждой кольцевой моды спектр сигнала является «зашумленным» вследствие развития трехволновых процессов взаимодействия спиновых волн, что обуславливает «замазанную» структуру фазового портрета (см. рис.4в). Это приводит к тому, что во временной области (см. рис.4б) на фоне амплитудного пьедестала формируются провалы длительностью $T_{d1} \approx 200$ нс, в которые вложены провалы меньшей длительности. При внимательном рассмотрении представленной на рис.4б временной реализации на ее амплитудном фоне можно выделить четыре характерных широких провала с $T_{d1} \approx 200$ нс, которые повторяются с квазипериодом $T_{r0} \approx 2$ мкс. Между указанными провалами устанавливаются квазипериоды следования $T_{r1} \approx 410$ нс, $T_{r2} \approx 540$ нс и $T_{r3} \approx 400$ нс, которые отмечены на рис.4д. Данные квазипериоды соответствуют частотам автомодуляции спиновых волн $f_{am0} \approx 500$ кГц, $f_{am1} \approx 2.4$ МГц, $f_{am2} \approx 1.8$ МГц $f_{am3} \approx 2.5$ МГц, возникающим в спектре сигнала за счет трехволновых параметрических спин-волновых взаимодействий.

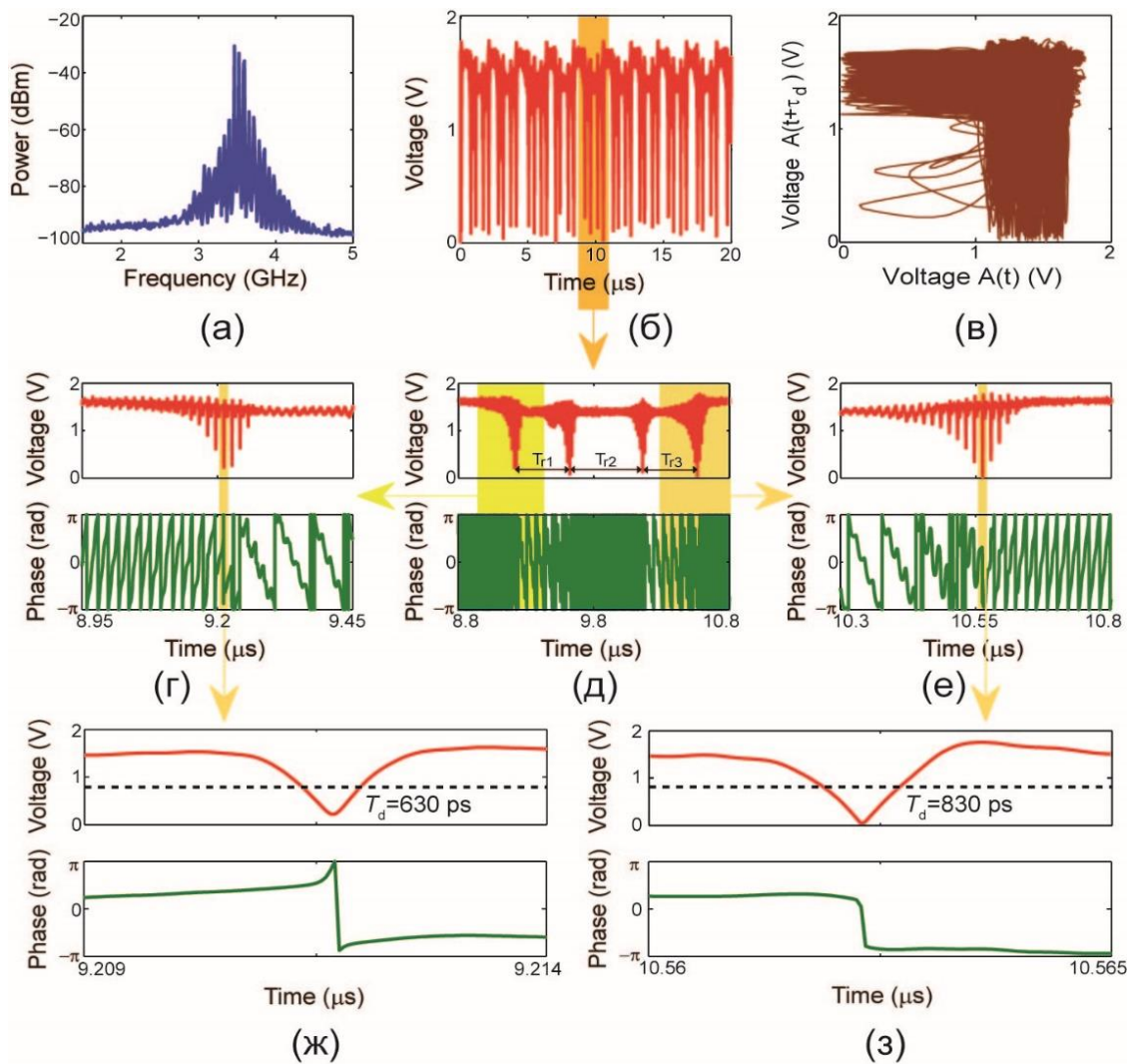


Рис.4. Спектр мощности (а), временные реализации (б, г-з) и фазовый портрет (в) последовательности многосолитонных комплексов, состоящих из темных спин-волновых солитонов. Результаты получены при $G=9.85$ дБ.

В тоже самое время, как следует из результатов, представленных на рис.4г,е, внутри каждого широкого провала наблюдается более тонкая структура в виде провалов гораздо меньшей длительности, количество которых может достигать 10. Амплитудный профиль центрального провала из этой последовательности имеет наибольшую глубину, что соответствует наибольшему изменению фазы внутри него. Фазовый сдвиг между соседними провалами тонкой структуры отличен от 2π . Как следует из результатов, представленных на рис.4ж,з, длительность узких провалов имеет величину $T_{d2} \approx 600-800$ пс, а их период следования $T_{r2} \approx 15-$

16 неопределяет частотный интервал между модами спектральной сетки частот.

Таким образом, из представленных на рис.4 результатов следует, при выбранном значении усиления кольца генерируется квазипериодическая последовательность многосолитонных комплексов, состоящих из параметрических темных солитонов (провалы большой длительности), внутри которых вложены четырехволновые солитоны ультракороткой длительности.

Заключение

В автореферате бакалаврской работы были продемонстрированы следующие основные результаты:

1. Экспериментально было показано, что использование в кольцевом резонаторе регулярного ЖИГ-волновода с конкурирующими трех- и четырехволновыми нелинейными спин-волновыми взаимодействиями совместно с насыщающейся нелинейностью усилителя приводит к генерации многосолитонных комплексов, состоящих из темных солитонов огибающей. Многосолитонный комплекс при этом имеет длительность порядка 500 нс и состоит из 3-4 темных солитонов огибающей с длительностью, изменяющейся в пределах от 2.5 нс до 4 нс.
2. В результате проведенных экспериментальных исследований было показано, что многосолитонные комплексы могут быть получены при использовании в цепи обратной связи кольцевого резонатора нерегулярного Г-образного магнотонного волновода. Данные многосолитонные комплексы содержат большее количество темных солитонов огибающей, число которых по сравнению со схемой с регулярным ЖИГ-волноводом увеличивается более, чем в два раза. Кроме того, длительность темных солитонов огибающей при использовании в кольце Г-образного ЖИГ-волновода уменьшается более, чем в три раза (с 2.5 нс до 630 нс).

Список литературы

1. Akhmediev, N. (Ed) Dissipative solitons: from optics to biology and medicine / N. Akhmediev, A. Ankiewicz – Berlin: “Springer-Verlag”, 2008 - 479 с.
2. Stratmann, M. Experimental observation of temporal soliton molecules / M. Stratmann, T. Pagel, and F. Mitschke // Physical Review Letters - 2005. - Vol. 95. – P. 143902.
3. Grelu, P. Dissipative solitons for mode-locked lasers/ P. Grelu, and N. Akhmediev // Nature Phot. - 2012. - Vol. 6. - P. 84-92.
4. Yan, D. Multiple dark-bright solitons in atomic Bose-Einstein condensates / D. Yan, J.J. Chang, C. Hamner [et al.] // Physical Review A - 2011. - Vol. 84. – P. 053630.
5. Demokritov, S.O. Experimental observation of symmetry-breaking nonlinear modes in an active ring / S.O. Demokritov, A.A. Serga, V.E. Demidov, [et al.] // Nature - 2003. - Vol. 26. - P. 159-162.
6. Grishin, S.V. Self-generation of chaotic dissipative multisoliton complexes supported by competing nonlinear spin-wave interactions / S.V. Grishin, B.S. Dmitriev, O.I. Moskalenko, [et al.] // Physical Review E - 2018. - Vol. 98. - P. 022209.
7. Kivshar, Yu. Optical solitons: from fibers to photonic crystals / Yu. Kivshar, G. Agrawal – Amsterdam: “Academic Press”, 2003 - 540 с.
8. Cole, D.C. Soliton crystals in Kerr resonators / D.C. Cole, E.S. Lamb, P. Del'Haye, [et al.] // Nature Photonics. - 2017 - Vol. 11. - P. 671-676.
9. Kartashov, Y.V. Robust Propagation of two-color soliton clusters supported by competing nonlinearities / Y.V. Kartashov, L.C. Crasovan, D. Mihalache, and L. Torner // Physical Review Letters – 2002- Vol. 89. – P. 273902.
10. Stratmann, M. Chains of temporal dark solitons in dispersion-managed fiber / M. Stratmann, F. Mitschke // Physical Review E. – 2005 – Vol. 72. – P. 066616.

11. Wu, M. Nonlinear spin waves in magnetic film feedback rings // *Solid State Physics* – 2010- Vol. 62. - P. 163-224.
12. Kalinikos, B.A. Self-Generation of microwave magnetic envelope soliton trains in yttrium iron garnet thin films / B.A. Kalinikos, N.G. Kovshikov, C.E. Patton // *Physical Review Letters* – 1998 – Vol. 80. - P. 4301-4304.
13. Kalinikos, B.A. Self-generation of fundamental dark solitons in magnetic films / B.A. Kalinikos, M.M. Scott, C.E. Patton // *Physical Review Letters* – 2000 - Vol. 84. - P. 4697-4700.
14. Калиникос, Б.А. Наблюдение автогенерации темных солитонов огибающей спиновых волн в ферромагнитных пленках / Б.А. Калиникос, Н.Г. Ковшиков, К.Е. Паттон // *Письма в ЖЭТФ* – 1998 – Т. 68. - № 3. – С. 229-233.